

9º SILUSBA (Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa)

TEORIA DA VULNERABILIDADE DE REDES HIDRÁULICAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (TVRHAA)

Carlos BASTOS

Engenheiro Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Portugal, carlos-bastos@sapo.pt

António DUARTE

Professor Auxiliar, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, aduarte@civil.uminho.pt

Isabel BENTES

Professora Associada, UTAD, Departamento de Engenharias, Quinta de Prados 5001-801 Vila Real, Portugal, ibentes@utad.pt

Jorge PINTO

Professor Auxiliar, UTAD, Departamento de Engenharias, Quinta de Prados 5001-801 Vila Real, Portugal, tiago@utad.pt

RESUMO

O objectivo deste trabalho é apresentar a Teoria da Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (TVRHAA) e, em particular, os seus principais fundamentos teóricos.

O contributo da sua utilização prende-se com o projecto de redes hidráulicas de abastecimento de água (RHAA) mais robustas sendo igualmente um importante auxiliar na gestão mais eficiente destes sistemas e atendendo a que as partes mais vulneráveis de uma RHAA são identificadas.

Palavras-chave: sistemas de abastecimento de água, gestão patrimonial de infra-estruturas, teoria da vulnerabilidade, cenários de dano.

1. INTRODUÇÃO

A Teoria da Vulnerabilidade Estrutural tem vindo a ser desenvolvida na Universidade de Bristol, no Reino Unido, Wu (1993) e Pinto (2002). Esta teoria é aplicada às estruturas e identifica as partes mais vulneráveis de uma estrutura através de cenários de dano vulneráveis. O conceito de vulnerabilidade está associado à desproporcionalidade passível de existir entre esforço e dano estrutural resultante. Uma estrutura é vulnerável se quando um pequeno esforço provoca um grande dano estrutural. A acção que origina esse esforço pode ser de qualquer tipo incluindo erro humano ou sabotagem.

Neste contexto, um trabalho de investigação que tem vindo a ser desenvolvido na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) com o objectivo principal de extrapolar os fundamentos teóricos da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural para as redes hidráulicas de abastecimento de água (RHAA) resultando, deste modo, uma emergente teoria designada por Teoria da Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (TVRHAA). Diversos trabalhos de investigação têm sido realizados de forma a estimar a probabilidade de ocorrência de danos estruturais em RHAA (KLEINER 2000), outros consistiram na realização de uma abordagem da vulnerabilidade de RHAA através de uma análise fuzzy (ZIDKO 2009). Contudo, a TVRHAA proposta neste trabalho efectua uma análise da vulnerabilidade de RHAA mais abrangente e poderá ser mais uma ferramenta de trabalho para o estudo desta temática.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA TVRHAA

Para melhor se familiarizar com a TVRHAA é importante conhecer os conceitos que se apresentam seguidamente e que constituem a sua base teórica.

Sub-RHAA primitiva é constituída por um troço e os seus respectivos nós.

Sub-RHAA é entendida como sendo um agrupamento de pelo menos dois troços (ramos) adjacentes e dos respectivos nós, Figura 1-b.

Sub-RHAA de referência é o(s) reservatório(s). Por questões de simplificação, é admitido nesta fase que a sub-RHAA de referência não sofre qualquer dano.

A *sub-RHAA de origem* entende-se como sendo toda a RHAA, incluindo o reservatório.

Anel de RHAA é a forma abstracta de representar uma RHAA. O anel de RHAA representado na Figura 1-c representa a RHAA mais simples (dois troços e um nó de ligação).

Dano de RHAA ou evento de deterioração corresponde a uma deterioração da RHAA que pode impossibilitar o abastecimento de água entre pontos dessa RHAA. Um dano de RHAA é causado por uma acção e esta pode ser de diversos tipos tal como excesso de pressão hidráulica, velocidade de escoamento excessiva, assentamento de terreno ou vibrações deste, erro humano na fase de projecto ou na fase de construção ou na fase de gestão e/ou na fase de manutenção, acto de sabotagem, entre outros. Nesta fase, o dano de RHAA é considerado como sendo a perda de um tubo da RHAA apenas por simplificação. Contudo este conceito poderá ser muito mais abrangente porque pode incluir aspectos do tipo desgaste dos tubos, obstrução, falta de qualidade da água, entre outros.

Qualidade de forma é o indicador da boa forma de uma RHAA ou de uma sub-RHAA.

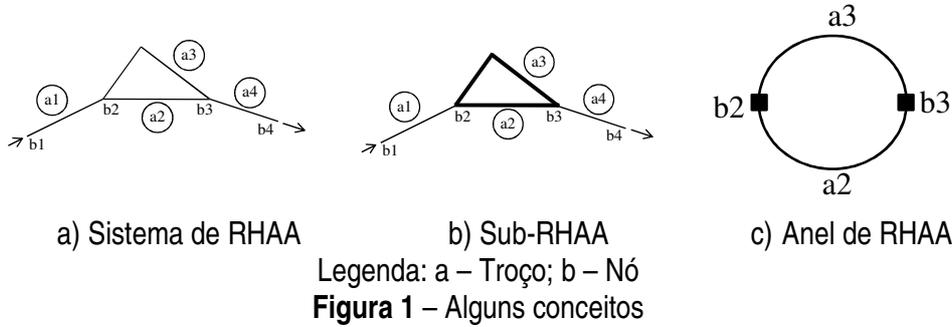
Conexão nodal é o indicador da interligação de uma sub-RHAA à restante RHAA.

Capacidade resistente ao dano é a grandeza que é directamente proporcional ao esforço necessário para a ocorrência de um dano de RHAA.

Cenário de dano é uma sequência ordenada de danos de RHAA (ou de eventos de deterioração) através dos quais o desempenho da RHAA se degrada.

Capacidade resistente ao dano relativa é entendida como sendo a relação entre o esforço requerido para a ocorrência de um cenário de dano e o esforço necessário para a ocorrência do cenário de dano total da RHAA.

Perda de RHAA é uma grandeza relativa à parte de uma RHAA que fica inoperável resultante da ocorrência de um cenário de dano.



2.1. Qualidade de forma

A qualidade de forma traduz a qualidade da forma geométrica de uma sub-RHAA. Esta grandeza é influenciada pelos seguintes aspectos: rigidez dos troços, tipo de união, orientação entre troços e quantidade de ligações, Figura 2. Após uma análise exaustiva de todas as variáveis intervenientes no dimensionamento hidráulico de uma RHAA (Bastos, 2008), propôs-se a perda de carga (ΔH_T) como sendo a variável que melhor avalia a qualidade de forma de uma RHAA. Deste modo considera-se que a qualidade de forma de uma sub-RHAA ou de uma RHAA pode ser quantificada através da Expressão 1.

$$\Delta H_T = \sum_{j=1}^p \Delta H_j + \sum_{i=1}^u \Delta H_{Li} \quad (1)$$

Em que: ΔH_T é a perda de carga total de uma RHAA ou uma sub-RHAA; ΔH é a perda de carga numa sub-RHAA primitiva; ΔH_L é a perda de carga localizada; p é o número de troços existentes na RHAA ou na sub-RHAA; u é o número de perdas de carga localizadas existentes na RHAA ou na sub-RHAA.

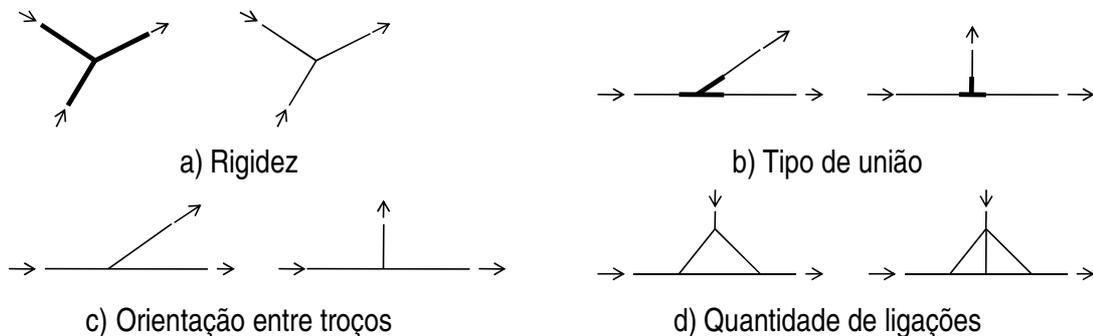


Figura 2 – Factores que influenciam a qualidade de forma de uma RHAA

Admitindo deste modo que quanto menor for a perda de carga total de uma RHAA ou de uma sub-RHAA melhor será a qualidade de forma dessa RHAA ou sub-RHAA.

2.2. Capacidade resistente ao dano

De acordo com o referido anteriormente, um elevado valor da capacidade resistente ao dano indica que a RHAA ou sub-RHAA é menos susceptível de se deteriorar. Bastos (2008) considerou que a área da secção transversal dos troços que constituem uma RHAA ou sub-RHAA era directamente proporcional a essa susceptibilidade e, como tal, propôs que a capacidade resistente ao dano de uma RHAA ou de uma sub-RHAA poderia ser quantificada através do somatório da área da secção transversal dos tubos que formam essa RHAA ou sub-RHAA (solução adoptada neste trabalho). Contudo, essa proposta apresenta como limitação o facto de RHAA ser construída com o mesmo tipo de material. De forma a contornar esta situação poderá considerar-se que a capacidade resistente ao dano seja quantificada através da pressão nominal. Contemplando que um dano possa ser uma obstrução, um desgaste do material ou a perda de qualidade da água as considerações anteriores ainda não permitem ser totalmente abrangentes no que respeita à quantificação da capacidade resistente ao dano e, como tal, será necessário desenvolver ainda mais trabalho de investigação neste sentido.

2.3. Conexão nodal

De acordo com a definição anterior, a conexão nodal (η) traduz a interligação que uma sub-RHAA tem com a restante RHAA ou as alternativas possíveis de abastecimento de água na zona da RHAA relativa a essa sub-RHAA, representa também a capacidade que essa sub-RHAA tem de formar anéis de RHAA com outras sub-RHAA. No caso mais simples (Figura 3), a sub-RHAA constituída pelo troço 1 e os nós 1 e 2 apresenta uma η correspondente ao somatório das sub-RHAA primitivas que convergem para os nós 1 e 2 (troços 2, 3, 4, 5 e 6) e, por isso, é igual a 5.

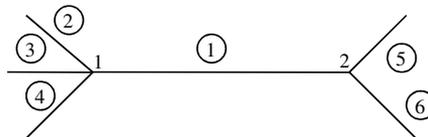


Figura 3 – RHAA para exemplificação da quantificação da conexão nodal

2.4. Distância ao reservatório

A distância ao reservatório (DIS) é a menor distância que a água tem que percorrer entre o reservatório e a sub-RHAA em análise e por isso é o menor valor do somatório dos comprimentos dos troços constituintes de cada um dos diferentes caminhos alternativos existentes na RHAA que permitem o transporte da água entre o reservatório e a sub-RHAA em análise.

2.5. Capacidade resistente ao dano relativa

De acordo com o referido anteriormente, a capacidade resistente ao dano relativa (E_r) pode ser quantificada através da Expressão 2.

$$E_r = \frac{E}{E_{total}} \quad (2)$$

Em que: E_r é a capacidade resistente ao dano relativa; E é a capacidade resistente ao dano; E_{total} é a capacidade resistente ao dano para a ocorrência do dano total da RHAA.

2.6. Perda de rede

Tendo em consideração o referido anteriormente relativo à perda de rede (γ) em que esta grandeza traduz numericamente a parte de uma RHAA que fica inoperável devido à ocorrência de um determinado cenário de dano propõe-se a Expressão 3 para a sua quantificação. Quando $\gamma=0$ é igual a zero então toda a RHAA está operacional, quando $\gamma=1$ é então a RHAA está completamente inoperável e não é possível abastecer de água nenhum ponto da zona.

$$\gamma = \frac{\Delta H_T (S')}{\Delta H_{total}} \quad (3)$$

Em que: γ é a perda de rede; $\Delta H_T(S')$ é a perda de carga das sub-RHAA que ficam inutilizadas (S'); ΔH_{total} é a perda de carga total de toda a RHAA.

2.7. Índice de vulnerabilidade

A vulnerabilidade de uma RHAA em relação a um determinado cenário de dano é quantificada através do índice de vulnerabilidade (φ). Este índice corresponde à desproporção existente entre γ e a capacidade resistente ao dano relativa (E_r) e pode ser traduzido pela Expressão 4.

$$\varphi = \frac{\gamma}{E_r} \quad (4)$$

Em que: φ é o índice de vulnerabilidade; γ é a perda de RHAA; E_r é a capacidade resistente ao dano relativa.

Um elevado valor deste índice relativo a um determinado cenário de dano representa que a RHAA é vulnerável em relação a esse cenário de dano porque o valor do esforço necessário para a ocorrência de dano é desproporcional à parte da RHAA que fica inoperacional.

3. APLICAÇÃO DA TVRHAA

A aplicação da TVRHAA a uma RHAA é composta essencialmente por três etapas e à semelhança da aplicação da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural. A primeira etapa consiste no processo de aglutinação, a segunda etapa é a representação da RHAA ou da sub-RHAA através de um modelo hierárquico e, a terceira e última etapa é relativa ao processo de desaglutinação desse modelo hierárquico. O processo de aglutinação é um processo iterativo e selectivo. O primeiro passo consiste na identificação dos primeiros candidatos de sub-RHAA primitivas a serem aglutinados entre si e de forma a gerar o primeiro anel de RHAA. O segundo passo consiste na selecção de novos candidatos de sub-RHAA primitivas que possam ser aglutinados entre si, ou à sub-RHAA formada no passo anterior. Este processo desenvolve-se sucessivamente até que toda a RHAA, incluindo o reservatório, esteja toda aglutinada, o que corresponde a ser representada por um único anel de RHAA. O processo de selecção de candidatos do processo de aglutinação recorre a cinco critérios de selecção que serão seguidamente descritos. A formação do modelo hierárquico de uma RHAA recorre à informação resultante do processo de aglutinação dessa RHAA e é fundamental para a realização do processo de desaglutinação. É através do processo de desaglutinação do modelo hierárquico que os cenários de

dano vulneráveis da RHAA são identificados e, é através destes, que a parte ou as partes mais vulneráveis de uma RHAA é localizada.

3.1. Processo de aglutinação da TVRHAA

Tal como foi referido anteriormente o processo de aglutinação da TVRHAA é iterativo e selectivo. A selecção de candidatos de sub-RHAA a ser aglutinados entre si recorre a cinco critérios de selecção e que são os seguintes por ordem de importância:

a) *Menor perda de carga total* (ΔH_{min}): O critério de menor perda de carga total é o primeiro critério de selecção a ser aplicado no processo de aglutinação. A perda de carga total traduz a qualidade de forma da RHAA. Para o efeito, do conjunto de sub-RHAA candidatas a ser aglutinadas deve-se seleccionar o candidato que apresente o menor valor de perda de carga total e porque se assume que quanto menor for a perda de carga total de uma RHAA, maior será a sua qualidade de forma. Quando este critério não for suficiente para seleccionar os candidatos a aglutinar então será necessário recorrer ao segundo critério de selecção que é a máxima capacidade resistente ao dano.

b) *Máxima capacidade resistente ao dano* ($E_{máx}$): A máxima capacidade resistente ao dano é o segundo critério de selecção do processo de aglutinação da TVRHAA. Quanto maior for a capacidade resistente ao dano de uma RHAA ou sub-RHAA maior será o esforço requerido para haver dano nessa RHAA ou sub-RHAA e, por isso, a RHAA ou sub-RHAA possui uma boa qualidade de forma. Neste contexto os candidatos a seleccionar para sofrer aglutinação que apresentam maior capacidade resistente ao dano serão escolhidos. Caso este critério não seja suficiente, então, terá que se recorrer ao terceiro critério de selecção que é a máxima conexão nodal.

c) *Máxima conexão nodal* ($\eta_{máx}$): A máxima conexão nodal é o terceiro critério de selecção e apenas deverá ser usado quando os dois anteriores não foram suficientes na decisão dos candidatos a seleccionar para uma aglutinação. Este critério consiste em seleccionar os candidatos que conduzem ao maior valor de conexão nodal.

d) *Máxima distância ao reservatório* ($DIS_{máx}$): A máxima distância ao reservatório é o quarto critério e consiste em escolher os candidatos que quando aglutinados entre si apresentam a maior distância ao reservatório. Considera-se que o facto de uma sub-RHAA estar afastada do reservatório corresponde a essa sub-RHAA ser, de alguma forma, menos vulnerável.

e) *Escolha Livre* (F_c): Quando os quatro critérios de selecção anteriores não forem suficientes para seleccionar dois candidatos de sub-RHAA a aglutinar então é necessário recorrer ao último critério de selecção que é a escolha livre. Neste caso, todos os candidatos quando aglutinados entre si dois a dois apresentam as mesmas características de vulnerabilidade, como tal, serão escolhidos com base numa escolha aleatória.

3.2. Formação do modelo hierárquico

Após a RHAA estar toda aglutinada e, por isso, poder ser representada por um único anel de RHAA, o processo de aglutinação termina. Com base na informação obtida através deste processo é possível formar o modelo hierárquico dessa RHAA. Tal como já foi referido, o modelo hierárquico de uma RHAA corresponde a uma representação abstracta dessa RHAA em que as sub-RHAA estão arrumadas em termos da sua qualidade de forma. A Figura 4 apresenta um exemplo de um modelo hierárquico de uma RHAA.

Neste modelo, as sub-RHAA primitivas (troços) são representadas por círculos cinzentos. A sub-RHAA de referência (reservatório) é representada por um rectângulo cinzento. As restantes sub-RHAA resultantes do processo de aglutinação são representadas por círculos brancos. Cada uma destas sub-RHAA tem associado o respectivo anel de RHAA com a indicação do critério de selecção que foi aplicado aquando do processo de aglutinação. A leitura de um modelo hierárquico de uma RHAA deve

ser feita de baixo para cima. A sub-RHAA do topo superior de um modelo hierárquico de uma RHAA é aquela que foi a última a ser definida no processo de aglutinação e representa toda a RHAA incluindo o reservatório (sub-RHAA de origem). No caso do modelo hierárquico da Figura 4 corresponde à sub-RHAA 9.

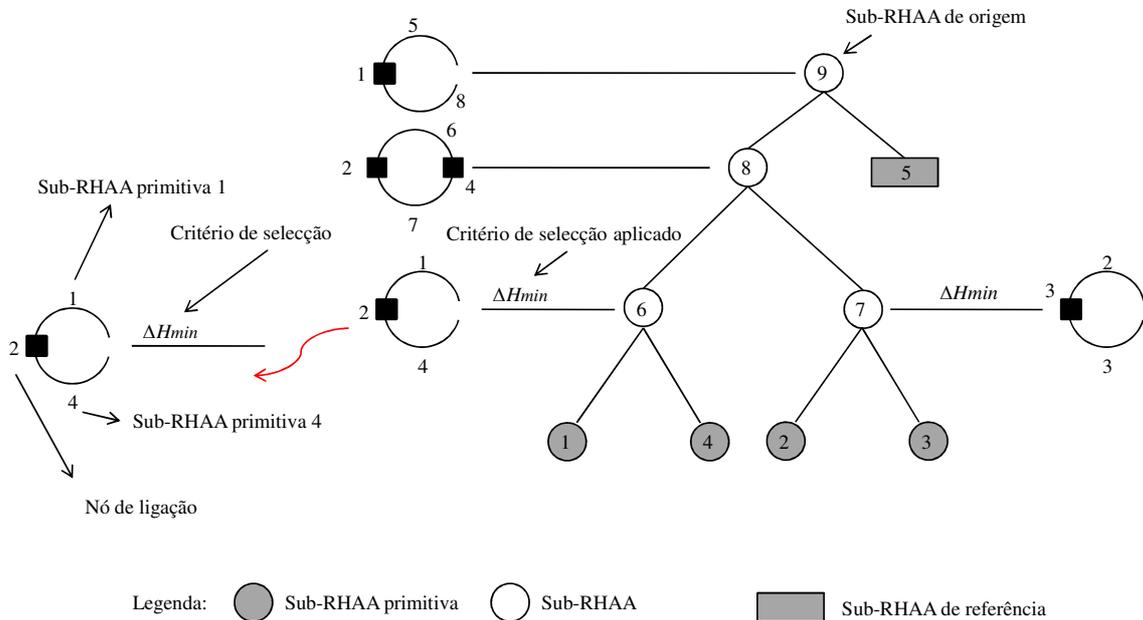


Figura 4 – Modelo hierárquico de uma RHAA

3.3. Processo de desaglutinação

O processo de desaglutinação corresponde à terceira e última etapa da aplicação da TVRHAA a uma RHAA. É através deste processo, que os cenários de dano vulneráveis de uma RHAA são identificados. Este processo tem como base o modelo hierárquico da RHAA pré-definido.

A desaglutinação ou desmembramento do modelo hierárquico de uma RHAA é processado no sentido descendente e tem início na última sub-RHAA definida no processo de aglutinação, procurando em cada anel de rede um possível evento de dano. À semelhança do processo de aglutinação também o processo de desaglutinação assenta num conjunto de critérios de selecção, estes critérios são os seguintes por ordem de importância: a sub-RHAA não é uma sub-RHAA de referência (N_R); a sub-RHAA está ligada directamente à sub-RHAA de referência (C_D); seleccionar uma sub-RHAA primitiva (troço) em detrimento de uma sub-RHAA (L_C); sub-RHAA apresenta o maior valor de perda de carga total ($S_{\Delta H}$); a sub-RHAA tem o menor valor de capacidade resistente ao dano (S_E); a sub-RHAA foi aglutinada posteriormente (C_L); escolha livre (F_C).

Quando um evento de dano de RHAA é identificado através deste processo é necessário verificar se a sub-RHAA em análise ou a RHAA tem capacidade de abastecer água. Caso uma das condições anteriores seja cumprida então este processo decorre na busca de outros eventos de dano da sub-RHAA, até que a sub-RHAA em análise ou a RHAA deixem de ter capacidade de abastecer água. Nesta fase, é identificado um cenário de dano vulnerável da RHAA e é relativo à sequência ordenada dos eventos de dano detectados. Contudo, o processo de desaglutinação prossegue até que todas as sub-RHAA definidas no processo de aglutinação (círculos brancos da Figura 4) sejam desaglutinadas.

3.4. Cenários de dano vulneráveis

Os cenários de dano vulneráveis identificados através da aplicação da TVRHAA a uma RHAA são os que se identificam e que se descrevem seguidamente.

Cenário de dano de colapso total: é o cenário de dano que corresponde à perda da totalidade de uma RHAA. A RHAA fica incapacitada de abastecer água a qualquer ponto. O cenário de dano de colapso total será aquele, que dentro dos cenários de dano de colapso total, que apresenta maior ϕ .

Cenário de dano de máxima vulnerabilidade: é aquele que apresenta maior desproporcionalidade entre perda de RHAA e o esforço requerido e por isso, apresenta o maior valor de ϕ . Está associado à parte mais vulnerável da RHAA.

Cenário de dano de mínima vulnerabilidade: é o cenário de dano que conduz à menor perda da RHAA, e geralmente corresponde ao dano da última sub-RHAA primitiva que foi aglutinada.

Cenário de menor esforço para haver dano: é aquele que corresponde ao elemento da RHAA que requer o menor esforço para sofrer dano de RHAA.

Cenário de dano de interesse: é um cenário de dano de interesse específico do utilizador.

4. APLICAÇÃO DA TVRHAA A UMA RHAA

De forma a exemplificar a aplicação da TVRHAA usou-se a RHAA representada na Figura 5. Esta RHAA é formada por 4 troços, 4 nós e pelo reservatório. O material adoptado foi o policloreto de vinil (PVC) com uma rugosidade de 0.01 mm. O valor da pressão de serviço adoptada para esta RHAA foi de 6 kgf/cm². Não se apresenta, neste trabalho, o dimensionamento hidráulico da RHAA por simplificação. Algumas características geométricas e hidráulicas da RHAA estão apresentadas no Quadro 1.

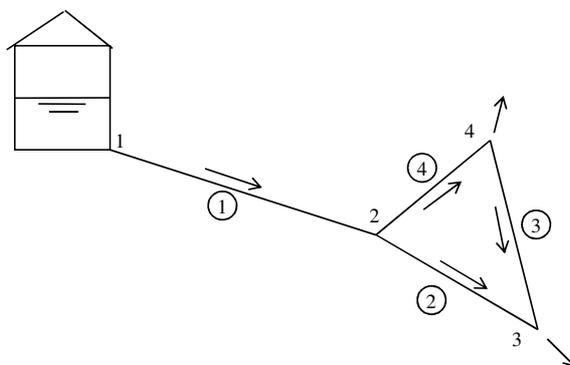


Figura 5 – RHAA usada como exemplo

Quadro 1 – Características geométricas e hidráulicas da RHAA

Sub-RHAA Primitiva	Nós	Comprimento (m)	Diâmetro comercial (mm)	Espessura (mm)	Caudal (l/s)	Perda de carga (m)
1	1; 2	500	200	5.9	18.0	0.995
2	2; 3	300	110	3.2	5.0	1.054
3	3; 4	300	110	3.2	5.0	1.054
4	2; 4	300	160	4.7	13.0	0.972

4.1. Processo de aglutinação

No 1º passo existem cinco candidatos de sub-RHAA, a serem aglutinados entre si e que estão identificados na 1ª coluna do Quadro 2. Para cada um destes candidatos a formar uma nova sub-RHAA foram determinadas as grandezas de ΔH_T , E , η e DIS . Aplicando-se os critérios de selecção do processo de aglutinação da TVRHAA conclui-se que o primeiro candidato a ser aglutinado é formado pelos troços 1 e 4 e, porque é o que apresenta menor valor de perda de carga total, ΔH_{min} .

Quadro 2 – 1º passo do processo de aglutinação

Candidatos	ΔH_T (m)	E (mm ²)	η	DIS (m)	Nova sub-RHAA
1+2	2.0490	4671.28	2	0	--
1+4	1.9670	5890.66	2	0	6
2+3	2.1080	2147.29	3	500	--
2+4	2.1080	3366.67	3	500	--
3+4	2.0260	3366.67	3	500	--

No Quadro 2 estão apresentados os valores de todas as grandezas relativamente a todos os candidatos. Contudo, este facto não é necessário atendendo a que quando um dos candidatos não é seleccionado não se torna necessário quantificar essas grandezas por razões de uso eficiente de tempo. Um processo análogo é repetido até que toda a RHAA, incluindo o reservatório, esteja toda aglutinada e representada por um único anel de RHAA, a Figura 6 ilustra este procedimento.

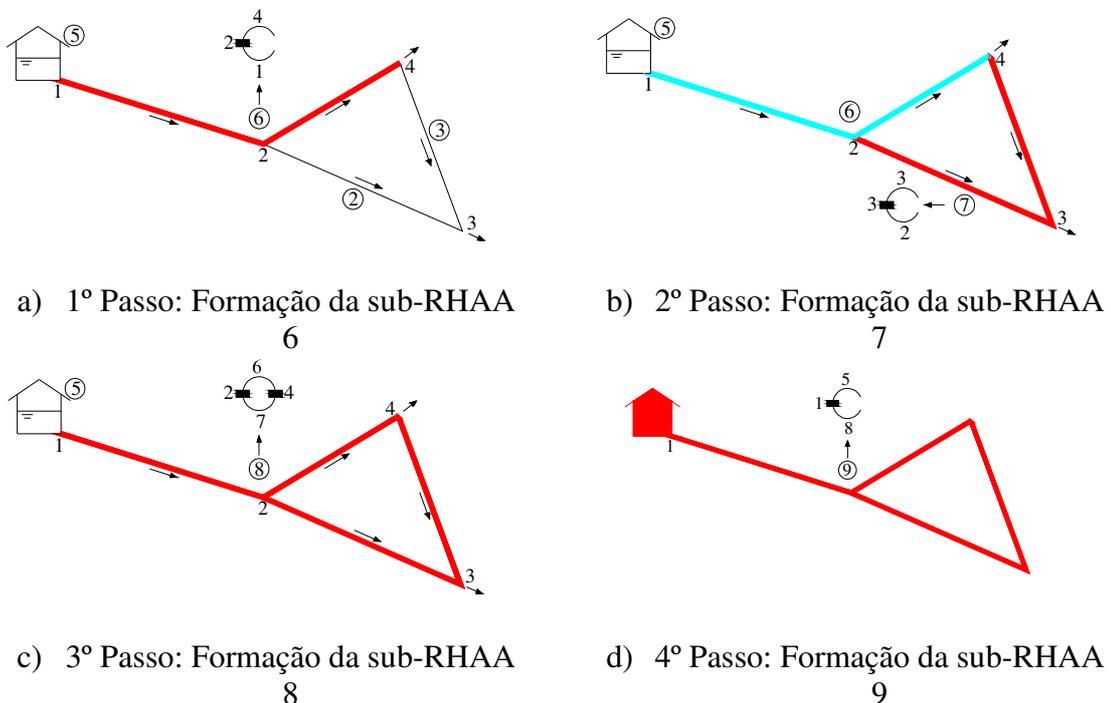


Figura 6 – Processo de aglutinação da RHAA usada como exemplo

4.2. Formação do modelo hierárquico

Com base na informação obtida através do processo de aglutinação obtém-se o modelo hierárquico da Figura 7 para a RHAA da Figura 5.

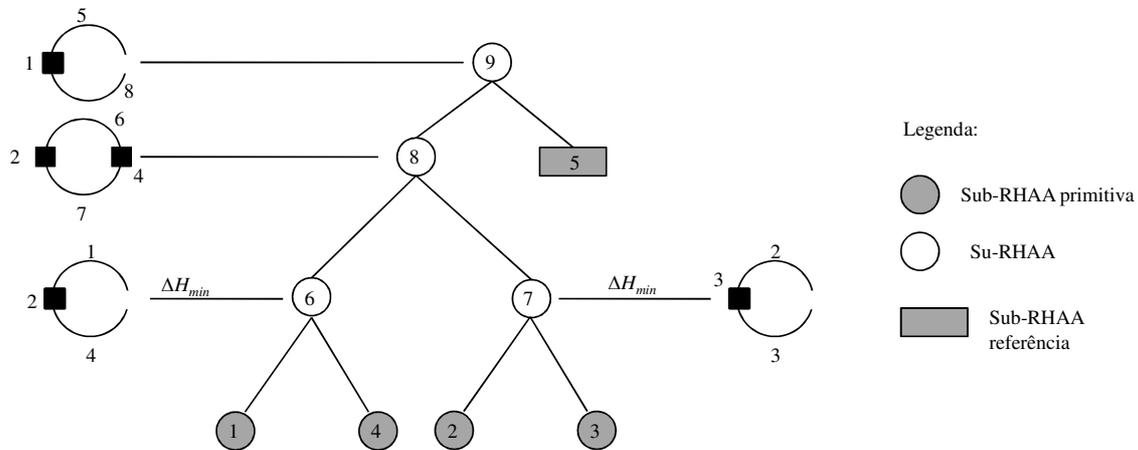


Figura 7 – Modelo hierárquico da RHAA usada como exemplo

4.3. Processo de desaglutinação

Baseado no modelo hierárquico da Figura 7 e recorrendo aos critérios de selecção do processo de desaglutinação obtém-se o seguinte desenvolvimento tendo em conta que a primeira sub-RHAA a ser desaglutinada é a que surge no topo superior do modelo hierárquico e que é a sub-RHAA 9: Como a sub-RHAA 5 é o reservatório selecciona-se a sub-RHAA 8 para ser desaglutinada e por isso o critério usado foi N_R ; A sub-RHAA 8 é formada pelas sub-RHAAs 6 e 7. Como a sub-RHAA 6 (1+4) está ligada directamente ao reservatório, Figura 5, então é a seleccionada (C_D); Analisando a sub-RHAA 6 observa-se que esta é formada pelas sub-RHAA primitivas 1 e 4. A sub-RHAA primitiva 1 é a seleccionada para sofrer dano porque está directamente ligada ao reservatório (C_D), Figura 5; Quando a sub-RHAA primitiva 1 (troço 1) sofre dano então a RHAA da Figura 5 fica impedida de efectuar qualquer abastecimento de água. Desta forma, o processo de desaglutinação da sub-RHAA termina. O primeiro cenário de dano vulnerável identificado é o relativo a haver dano no troço 1 (T1).

A Figura 8 representa esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RHAA 9.

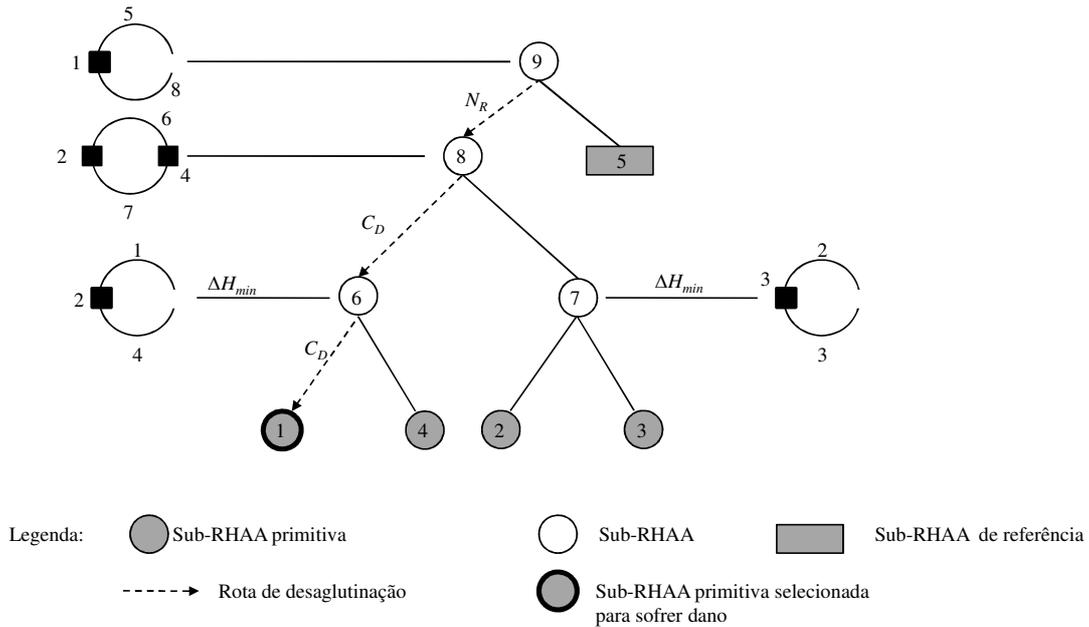


Figura 8 – Desaglutinação da sub-RHAA 9

Associado a este cenário de dano são quantificados os parâmetros de vulnerabilidade de γ , E_r e φ que estão apresentados no Quadro 3.

As sub-RHAA do modelo hierárquico a serem desaglutinadas seguidamente são a 8, a 7 e a 6, Figura 7. Apenas a desaglutinação da sub-RHAA 7 poderá conduzir a um cenário de dano vulnerável diferente do identificado anteriormente.

A sub-RHAA 7 é vista como sendo uma RHAA autónoma, logo será necessário recorrer ao processo de aglutinação desta nova RHAA. A exemplificação deste processo não será aqui apresentada por razões de simplificação. O cenário de dano vulnerável identificado aquando da desaglutinação sub-RHAA 7 consiste na sequência ordenada de dois eventos de dano que são: danificar o troço 3 seguido do dano no troço 2, T3+T2. Os parâmetros de vulnerabilidade associados a este cenário de dano também estão apresentados no Quadro 3.

Após esta análise o processo de desaglutinação da RHAA usada como exemplo termina.

Quadro 3 – Cenários de dano vulneráveis identificados na RHAA usada como exemplo

Cenário de Dano	γ	E_r	φ
T1	1	0.448	2.232
T3+T2	0.517	0.267	1.936

Face aos resultados apresentados no Quadro 3 e à informação obtida durante a aplicação da TVRHAA à RHAA usada como exemplo verifica-se que o cenário de dano de colapso total corresponde ao troço 1 sofrer dano (T1). Porque implica haver uma incapacidade da RHAA efectuar qualquer abastecimento de água ($\gamma=1$). O cenário de dano de colapso total também é o cenário de máxima vulnerabilidade neste caso porque T1 é o cenário de dano vulnerável que apresenta o maior valor de φ , Quadro 3. Trata-se de uma coincidência em vez de uma condição. O cenário de dano de mínima vulnerabilidade corresponde a haver dano na sub-RHAA primitiva 2 ou 3 e, porque ambas foram as últimas sub-RHAA primitivas a serem aglutinadas, Figura 7.

O cenário de menor esforço para haver dano corresponde a haver dano nas sub-RHAA primitivas 2 ou 3 porque são aquelas que apresentam o menor valor de E .

A ocorrência do cenário de dano T3+T2, Quadro 3, resulta na perda de cerca de 50% da RHAA porque $\gamma=0.517$ e apresenta uma vulnerabilidade ligeiramente inferior à do cenário de dano de colapso total.

Os resultados de vulnerabilidade obtidos neste exemplo são em parte os esperados. No entanto, em RHAA reais e mais complexas a aplicação da TVRHAA poderá dar informação acerca da vulnerabilidade dessas RHAA que poderá ser muito útil. Por sua vez, sendo estes resultados os esperados também válida de certo modo esta teoria.

5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A TVRHAA é uma teoria emergente que tem vindo a ser desenvolvida na UTAD. A sua aplicação poderá contribuir para a obtenção de RHAA mais robustas atendendo a que a(s) parte(s) mais vulnerável(eis) dessa RHAA poderão ser identificadas.

Os fundamentos teóricos da TVRHAA foram apresentados neste trabalho e resultam da extrapolação dos fundamentos teóricos da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural usada no contexto das estruturas e mais solidificada em termos de aplicação.

A aplicabilidade da TVRHAA foi demonstrada com o recurso a uma RHAA simples e as suas potencialidades evidenciadas.

BIBLIOGRAFIA

BASTOS C A. Aplicação da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural às Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água, Vila Real (Portugal), Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2008.

KLEINER Y, RAJANI B. Considering time-dependent factors in the statistical prediction of water main breaks. American water works association: Infrastructure conference. Baltimore, Maryland. March 12-15. pp 1-12. 2000.

PINTO J T, BLOCKLEY D I, WOODMAN N J. Vulnerability Strutural Safty. 24: 107-122, 2002.

WU X, BLOCKLEY D I, WOODMAN N J. Vulnerability Analysis of Strutural Systems, Part I: Rings and clusters, Part II: Failure Scenario. J. Civil Engineering Systems, 10, 301-333, 1993.

ZIDKO V, RAMOS H. Fuzzy model in the vulnerability assessment of water supply systems. Recurso Hídricos. Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Vol. 30-1. pp 5-25. Maio de 2009.